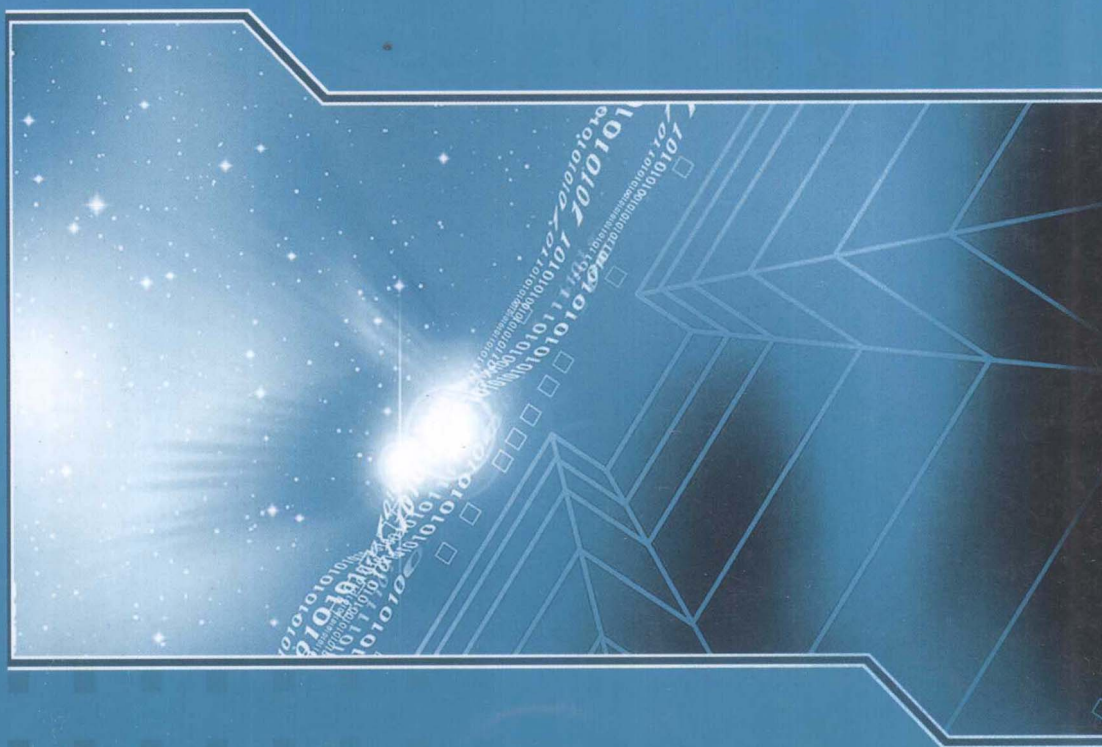




核动力装置用泵

主编 高璞珍 主审 庞凤阁



内容简介

根据核动力装置用泵的特点和种类,有选择、有侧重地编著了本书。在详细介绍离心泵基本理论的基础上,介绍了核动力装置用的一回路主冷却剂泵、二回路给水泵、凝结水泵和循环水泵,并简要介绍了离心泵之外的其他类型泵的结构和工作原理。

本书可作为高等院校核工程专业本科生的教材,也可供从事核动力工作的人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

核动力装置用泵/高璞珍主编.—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009

ISBN 978-7-81133-590-2

I.核… II.高… III.核动力装置-泵
IV.TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 060362 号

核动力装置用泵

高璞珍 主编

责任编辑 程小东

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:10 字数:200千字

2009年8月第2版 2009年8月第2次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-81133-590-2 定价:15.80元

前 言

流体机械是动力工程的重要组成部分。流体机械中的泵在国民经济和工农业生产中起着重要的作用。

动力与能源工程专业的“流体机械”或者“泵与风机”是一门重要的专业课。在通常的有关“泵与风机”的教材中,主要对离心式泵与风机进行介绍。目前,关于核动力装置用泵的书还非常少见。针对这种现状,编者在调研收集了流体机械、泵与风机、核动力装置的有关书籍和文献的基础上,根据核动力装置中使用的泵的特点和种类,有选择、有侧重地编著了本书。

全书分三章。因为离心泵是动力装置中也是核动力装置中最主要的一类泵,所以作为基础,首先在第一章详细介绍了离心式泵的基本理论,包括离心泵的结构、工作原理、性能、运行与调节等。第二章详细地介绍了核动力装置中的几种专用泵:一回路主冷却剂泵、二回路给水泵、凝结水泵和循环水泵。对主冷却剂泵,重点介绍了轴封式主泵,也介绍了屏蔽式主泵。第三章简要介绍了离心泵以外的其他类型泵的结构和工作原理,并对往复泵和喷射泵作了较为详细的介绍。

本书不讲述泵的设计,侧重介绍与泵的使用相关的知识,希望读者通过本书的学习掌握泵的基本原理和特性,以利于实际工作中泵的选型、运行与调节。

本书可作为高等院校核工程专业本科生的教材,也可供从事核动力工作的人员使用和参考。

本书完成之后,王兆祥教授认真审阅了全书,并提出宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。此外,还向关心本书出版和提出宝贵意见的同志们表示深切的谢意。

由于编者水平和经验有限,书中错误在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者
2009年6月

目 录

第 1 章 离心泵基本理论	1
1.1 泵的地位、作用和分类	1
1.2 离心泵的主要部件和性能参数	3
1.3 离心泵的叶轮理论	10
1.4 叶片形状及其对性能的影响	16
1.5 损失与效率	19
1.6 离心泵的性能曲线	25
1.7 相似理论在泵中的应用	32
1.8 水泵内的汽蚀	43
1.9 管路特性曲线及泵的工作点	56
1.10 泵的并联、串联工作	61
1.11 运行工况的调节	68
1.12 轴向力及其平衡措施	74
1.13 离心泵的故障	78
思考题	80
习题	81
第 2 章 核动力装置用泵	86
2.1 反应堆冷却剂泵概述	86
2.2 主泵的结构	91
2.3 主泵的特性	99
2.4 主泵的瞬态和紧急状态	112
2.5 主泵水化学	115
2.6 主泵的维护和保养	116
2.7 核动力用屏蔽泵	118
2.8 给水泵	120
2.9 凝结水泵	127
2.10 循环水泵	129
思考题	132

习题	133
第3章 其他类型的泵	134
3.1 其他类型泵的工作原理	134
3.2 往复式泵的性能曲线	139
3.3 喷射泵设计计算	141
思考题	149
习题	150
参考文献	151

第1章 离心泵基本理论

1.1 泵的地位、作用和分类

1.1.1 泵在国民经济中和核动力装置中的地位与作用

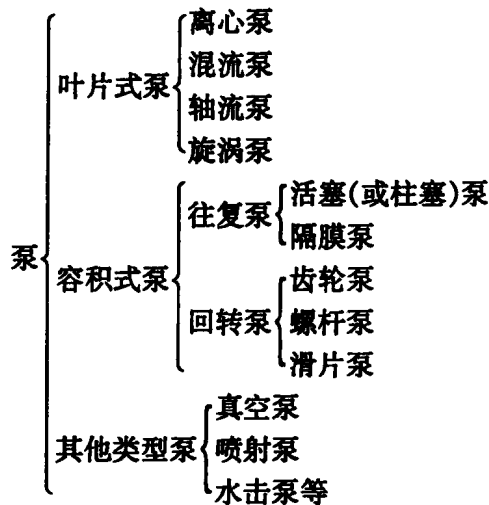
汽轮机、水轮机、泵与风机均属流体机械,前两者是把流体的势能和动能转变为机械的能量的动力设备,而泵与风机则是把原动机的能量转变为流体的势能和动能的一种动力设备,泵抽送液体,风机抽送气体。于是,泵可以定义为:泵是把原动机的机械能转化成它所输送的流体的能量的机械。泵一般用来将流体从位置较低的地方抽吸上来,沿管路输送到位置较高的地方去;也可以用来将液体从压强较低的容器中抽吸上来,并克服沿途阻力输送到压强较高的容器中,使流体增加压力势能。

巨型泵流量可达每小时几十万立方米,而微型泵流量则可在每小时几十毫升以下。压强可从常压到1 000 MPa,输送的液体的温度范围为 $-200\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

泵与风机广泛地应用在国民经济的各个方面。例如,农业方面的灌溉和排涝,采矿工业中坑道的通风及排水,风动工具和水力采煤的动力,冶金工业中各种冶炼炉的鼓风以及气体和液体的输送,石油工业中的输油和注水等,都离不开泵和风机。泵被列为通用机械。泵是化工、石油部门的关键设备之一,有人把泵比喻为化工生产工艺流程的“心脏”。矿业生产中,泵的耗电量最大,占整个矿业耗电量的20%~40%。电力部门离不开泵,例如,热力发电厂需要锅炉给水泵、凝结水泵、循环水泵和灰渣泵等,给水泵是电厂中耗电量最多的设备之一。国防建设离不开泵,一些国防尖端技术,不但需要泵,而且对泵有很多的特殊要求,如能输送高温、高压和有放射性的液体,有的还要求泵不允许有一点泄漏等。在船舶工业中,每艘远洋轮上所用的泵一般有上百台,其形式也多种多样。在压水堆核动力装置中,泵起着极为重要的作用,一回路中驱动主冷却剂循环的主泵,二回路中的给水泵、凝结水泵、滑油泵、循环水泵都是必不可少的设备。大亚湾核电站仅离心泵就有63种不同形式和大小的泵共350台。

1.1.2 泵的分类

泵的种类繁多,一般按工作原理,大致可分类如下:



叶片式泵又称叶轮式泵或透平式泵。这类泵的工作机构是带有叶片的叶轮,叶轮被紧固在转轴上,转轴带动叶轮旋转来输送流体,对流体做功,使流经叶轮的流体能量增大。

容积式泵又称定排量式泵。这类泵通过工作室容积的周期性变化来输送流体,对流体做功,使流体的能量增大。而每个工作周期内排出的流体容积是不变的。

其他类型泵,凡是无法归入以上两大类的泵都属此类。例如,喷射泵是利用能量较高的流体来输送能量较低的流体。

叶片式泵按其结构形式,分类如下。

(1)按主轴方向分

卧式:主轴水平放置;

立式:主轴垂直放置;

斜式:主轴倾斜放置。

(2)按液体流出叶轮的方向分

离心式:装径流式叶轮;

混流式:装混流式叶轮;

轴流式:装轴流式叶轮。

(3)按吸入方式分

单吸:装单吸叶轮;

双吸:装双吸叶轮。

(4)按级数分

单级:装一个叶轮;

多级:同一根轴上装两个或两个以上的叶轮。

(5)按壳体剖分方式分

分段式:壳体按与主轴垂直的平面剖分;

分开式(中开式):壳体在通过轴心线的平面上分开;

水平中开式:在中开式中,剖分面是水平的;

垂直中开式:在中开式中,剖分面是垂直的;

斜中开式:在中开式中,剖分面是倾斜的。

节段式:在分段式多级泵中,每一级壳体都是分开式的。

(6)按泵体形式分

蜗壳泵:叶轮排出侧具有带蜗室的壳体;

双蜗壳泵:叶轮排出侧具有双蜗室的壳体;

透平泵:带导叶的离心泵,也叫导叶式泵;

筒式泵:内壳体外装有圆筒状的耐压壳体;

双壳泵:筒式泵以外的双层壳体泵。

某一具体型号的泵往往是几个分类名称的组合,如BA型泵是单级单吸蜗壳式离心式水泵,通常简称为单悬臂式离心水泵。

1.2 离心泵的主要部件和性能参数

1.2.1 离心泵的主要部件

1. 叶轮

叶轮又称工作轮,是泵的核心,也是过流部件的核心。泵通过叶轮对流体做功,使其能量增加。流体由叶轮中心进入叶轮,自轮缘排出。

叶轮的形式有封闭式、半开式、开式三种,如图1.1所示。封闭式叶轮由前盖板、后盖板、叶片和轮毂等构成,一般用来输送清水,如核动力装置中的给水泵。半开式叶轮没有前盖板,开式叶轮则前、后盖板都没有,这两种叶轮一般用来输送含杂质的液体,如电厂中的灰渣泵、泥浆泵等。

叶轮按吸入方式分为单吸叶轮和双吸叶轮,如图1.2所示。单吸叶轮从一面吸入液体,双吸

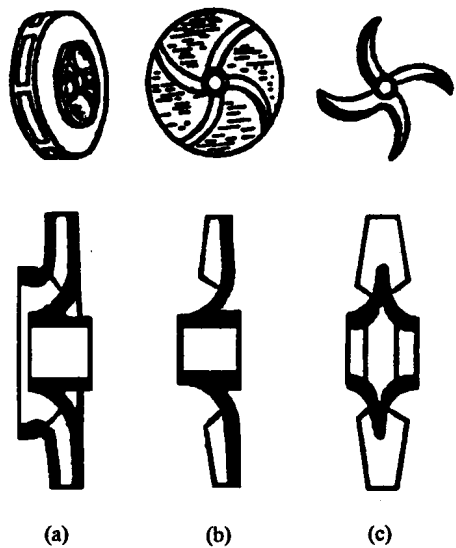


图1.1 离心式泵的叶轮形式
(a)封闭式叶轮;(b)半开式叶轮;(c)开式叶轮

叶轮从两面吸入液体。

2. 吸入室

为了使水流均匀地,并且在损失最小的情况下流入叶轮,在叶轮前装有吸入室。吸入室是主要的过流部件,有锥形、环形、螺旋形等,如图1.3所示。小型单吸单级悬臂式泵一般采用圆锥形吸入室,分段式多级离心泵采用断面为环形的吸入室,单级双吸泵或水平中开式多级泵一般均采用螺旋形吸入室。

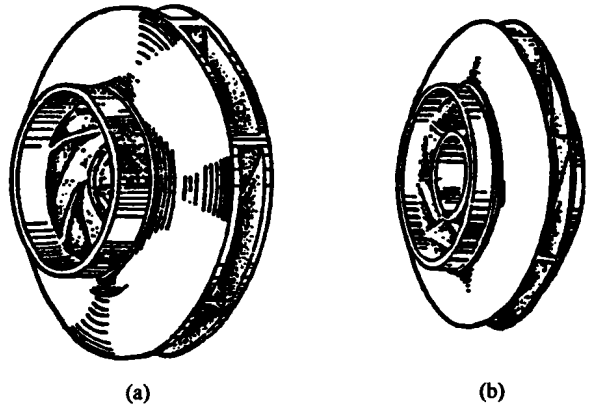


图 1.2 单吸、双吸叶轮

(a)单吸式叶轮;(b)双吸式叶轮

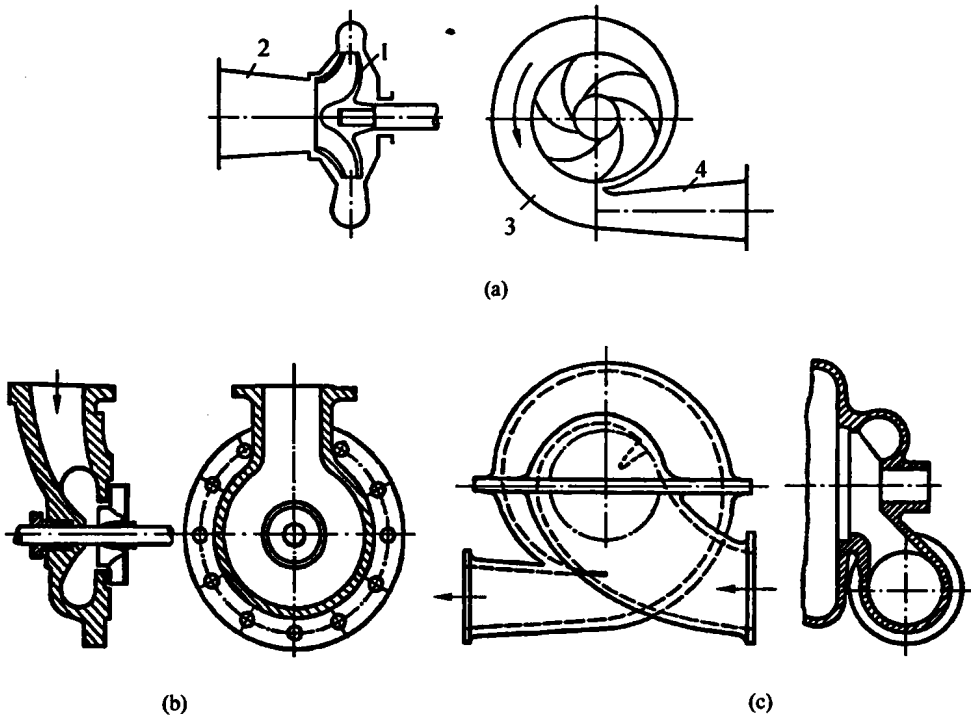


图 1.3 吸入室

(a)锥形吸入室;(b)环形吸入室;(c)螺旋形吸入室

1—叶轮;2—吸入室;3—压水室;4—压水管

3. 压水室(蜗壳)

在末级叶轮的出口处装有压水室,其作用是收集从叶轮流出的液体,并将液体引入压水管。压水室是主要的过流部件,一般有环形和螺旋形两种,如图1.4所示。分段多级泵一般采用环形压水室。单级双吸泵或水平中开式泵一般采用螺旋形压水室。

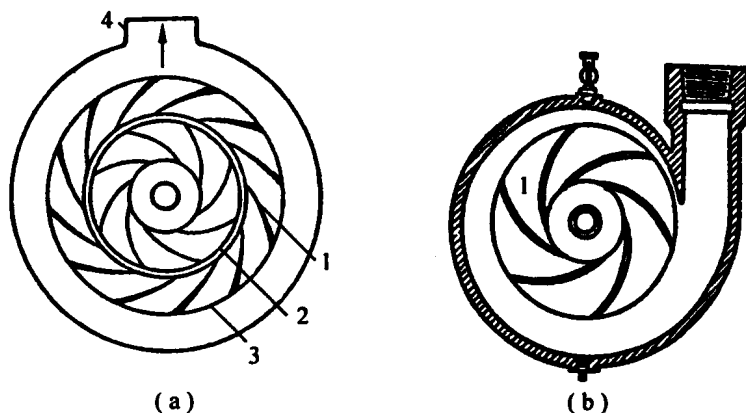


图 1.4 压水室

(a) 环形压水室:1—导叶片;2—叶轮;3—导叶;4—压水管

(b) 螺旋形压水室:1—叶轮

4. 密封环

密封环又叫口环。一般装在泵体上,与叶轮吸入口外圆构成很小间隙,如图1.5所示。由于叶轮出口处的液体压强较高,而进口处的压强又很低,所以,泵体内的液体总有流向叶轮吸入口的趋势。密封环的主要作用就是防止叶轮入口与泵体之间的液体漏损。密封环易磨损,应定期更换。密封环与叶轮吸入口外圆间隙一般为 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$ 。

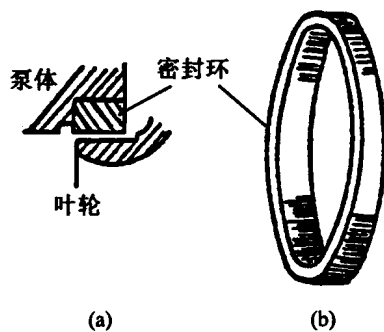


图 1.5 密封环

(a) 装配简图;(b) 外环

5. 轴、轴封装置

轴是传递扭矩的主要部件。中小型泵多采用平轴,叶轮滑配在轴上。大型泵多采用阶梯式轴,叶轮用热套法装在轴上。

在旋转轴与固定的泵壳间具有间隙,为了防止液体流出泵外或空气漏入泵内,一般在轴与泵壳之间设有轴密封装置。通常把轴和泵体间的密封称为轴封装置。近年来高温高压泵不断发展,密

封问题更加重要,已成为影响泵安全工作的重要因素之一。

轴封装置主要有以下几种。

(1) 填料密封

它主要由填料箱、填料、水封环、填料压盖等组成。它的密封主要靠泵轴外表面和填料接触达到密封目的,是使用最早,也是最常使用的一种轴封形式。图 1.6 所示是一种带水封环的压盖填料密封,目前使用最多。填料又叫盘根,它是一种石墨或黄油浸透的棉织物及石棉,有的是金属箔石棉芯子等。密封的严密性可用松紧压盖的方法来调节。一般要求调整到每 1~2 s 漏一滴左右,不要过紧,过紧会造成摩擦过大而发热冒烟,甚至烧坏填料或轴套;也不能过松,过松会大量漏水,容易窜到轴承里使油乳化。

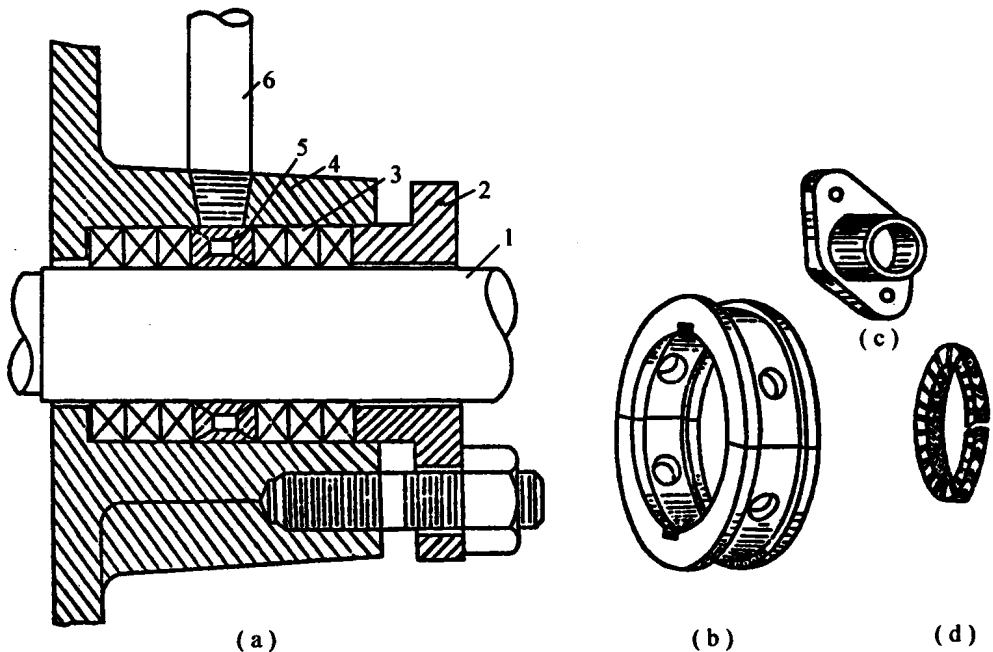


图 1.6 带水封环的填料密封

(a) 填料密封; (b) 水封环; (c) 填料压盖; (d) 填料

1—轴; 2—压盖; 3—填料; 4—填料箱; 5—水封环; 6—引水管

(2) 机械密封

它又叫端面密封。主要靠静环和动环经过精密加工的端面沿轴向紧密接触来达到密封目的,如图 1.7 所示。机械密封比填料密封的密封性好,泄漏少,寿命长,功率损失小。近代在高温高压泵、高转速的泵上得到了广泛应用。但其制造较复杂,价格贵,安装技术要求也较高。

另外还有迷宫式密封、浮动环密封等。

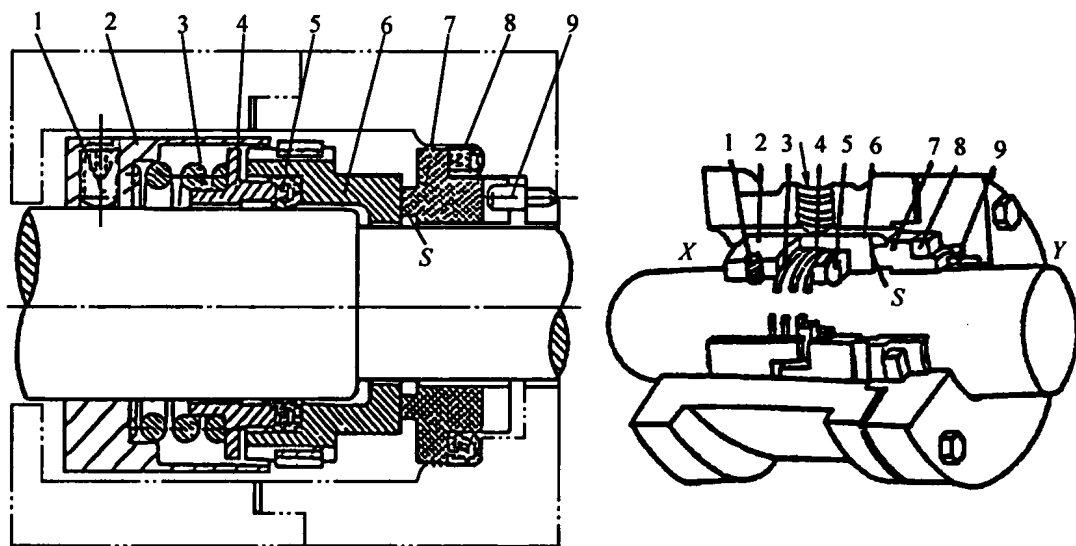


图 1.7 机械密封

1—传动螺钉;2—传动座;3—弹簧;4—推环;5—动环密封圈;6—动环;7—静环;8—静环密封圈;9—防转销;
S—密封端面;X—大气;Y—被密封介质

6. 管道附件

离心泵的附件(见图 1.8)主要有以下几种。

(1) 吸水管和排水管

(2) 滤网

装在吸入口,过滤水中杂质。

(3) 底阀

底阀装在吸水管底部,是单向阀,只允许液体向泵方向单向流动。泵启动前,首先应灌水把叶轮淹没,由底阀控制,使泵体内和吸水管内保持充满液体的状态。大型装置上为了节省能量,常不用底阀,而用真空抽吸。若水源比水泵高,则底阀不必要。

(4) 出口调节阀

用来调节流量。

(5) 出水管上的止回阀

用以阻止出水管中的液体向泵倒流。当原动机停车时,若无此装置,则出水管中的水倒流进水泵,易造成水泵的损坏。

(6)放气旋塞

位于泵壳顶部,在水泵充水时用于排气。

(7)放水旋塞

一般安放在水泵最低处,在严冬季节为防止冻裂壳体或检修时放水之用。

(8)充水设备

在出水管道上加接具有阀门的供水管或者直接与真空泵相接。

(9)真空表

装在吸水管接头处,以测量水泵进口处的真空度。

(10)压力表

装在出水管接头处,以测量水泵出水压强。

1.2.2 离心式泵的性能参数

离心式泵(与风机)的性能参数主要有扬程、流量、转速、功率、效率等。这些参数都可以在泵的样本中由特性曲线找到。此外,还有表示泵汽蚀性能的参数——汽蚀余量,在后文专门叙述。

1. 流量

流量是指泵(与风机)在单位时间内所输送流体的数量,也称为排量。它可以用容积流量 Q 表示,也可以用质量流量 Q_m 表示。常用单位为:容积流量用 m^3/s 、 m^3/h ,质量流量用 kg/s 、 t/h 等。

容积流量与质量流量的关系为

$$Q_m = \rho Q \quad (1.1)$$

式中 ρ ——流体密度, kg/m^3 , 常温清水 $\rho = 1\,000\ \text{kg}/\text{m}^3$;

Q ——容积流量, m^3/s ;

Q_m ——质量流量, kg/s 。

水的密度在常温常压下,随温度、压强变化不大。空气的密度则随温度、压强的变化而变化,所以在风机设计中,一般不采用质量流量。

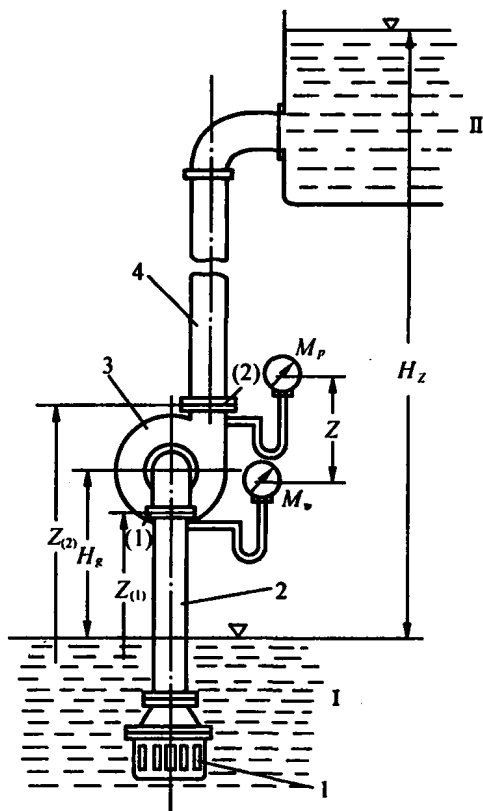


图 1.8 离心泵的附件

1—过滤网;2—吸水管路;3—泵;4—排出管路;
 H_g —泵的安装高度; H_z —吸水池和排水池液面高差;
 I、II—吸水池、排水池; M_v —真空表; M_p —压力表;
 $Z(1)$ 、 $Z(2)$ —泵进、出口至基面的高度

2. 扬程(压头)

扬程是指单位重量液体通过泵后所获得的能量增加值,用 H 表示,单位为 m ,即排出液体的液柱高度。

风机的压头称为全压或全风压,是指单位体积的气体流过风机叶轮时所获得的能量增加值,用 p 表示,单位为 Pa 等。

泵的扬程并不是实际扬水的高度。

泵的扬程,可按下式计算:

$$H = H_2 - H_1$$

式中 H_1, H_2 ——泵进、出口处的总压头,即

$$H_1 = Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$$

$$H_2 = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\text{扬程} \quad H = Z_2 - Z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (1.2)$$

式中 Z_1, Z_2 ——泵进口 1、出口 2 处位置高度, m ;

p_1, p_2 ——泵进口 1、出口 2 处表压强, Pa ;

v_1, v_2 ——泵进口 1、出口 2 处液流平均速度, m/s ;

ρ ——抽送液体的密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

测量泵的扬程时,通常在泵的入口和出口法兰处分别装一个真空表和一个压力表(如果入口压强高于大气压强,也装压力表)。由其读数和速度水头可以计算出水泵扬程。如果进、出口两表安装的高度相同,即 $Z_1 = Z_2$,同时又有进、出口的管径相等,则 $v_1 = v_2$,式(1.2)可表示为

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g}$$

压力表、真空表的读数可以换算为水柱高度,例如,1个工程大气压($98\ 100\ Pa$)换算为水柱高度则为 $10\ m$ 。

当泵入口压强 p_1 (绝对压强)小于大气压强 p_a 时,称之为真空状态,真空度为 $p_a - p_1$,换算为液柱高度则为 $\frac{p_a - p_1}{\rho g}$ 。

当入口压强 $p_1 = 0$ 时,则能产生 $98.1\ kPa(10\ mH_2O)$ 的真空度。但实际上, p_1 不可能等于零,真空度也总是小于 $98.1\ kPa(10\ mH_2O)$ 的。

3. 转速

离心泵的转速是指叶轮的旋转速度,用 n 表示,单位为转/分(r/min 或 rpm)。一般泵的设计转速采用相应的直联电动机的额定转速。运行时,必须按照说明书或铭牌上规定转速运转,否则将达不到设计要求,甚至导致部件超速损伤。

4. 功率

泵(与风机)的功率可分为有效功率、轴功率和原动机功率。

有效功率是指单位时间内通过泵(或风机)的流体所获得的能量,也就是泵(与风机)的输出功率,用 N_e 表示,单位为 kW。对于泵,有

$$N_e = \frac{\rho g Q H}{1000} \quad (1.3)$$

轴功率是泵运转时,由原动机传给泵(或风机)轴上的功率,用 N 表示,单位为 kW。泵的功率大多是指泵的轴功率。

$$N = M\omega \quad (1.4)$$

式中 N ——轴功率, W;

M ——轴上扭矩, $N \cdot m$;

ω ——轴角速度, $1/s$ 。

原动机功率又称配套功率,即和泵配套的原动机功率,用 N_g 表示。

轴功率不可能完全传给流体,其中有一部分损失掉了,所以 $N_e < N$ 。考虑泵(与风机)运转时可能出现超负荷情况,所以原动机的配套功率通常选择得比轴功率大些,即 $N_g > N > N_e$ 。

5. 效率

有效功率与轴功率之比称为总效率。用符号 η 表示,即

$$\eta = \frac{N_e}{N} \times 100\% \quad (1.5)$$

离心泵的效率一般在 45% ~ 90% 之间,离心风机的效率在 50% ~ 91% 之间。

1.3 离心泵的叶轮理论

离心式泵工作时,由原动机带动叶轮旋转,叶轮上的叶片就对流体做功,从而使通过叶轮的流体能量升高,叶轮是实现机械能转换为流体能量的部件。本节着重讨论叶轮对流体做功的原理,做功大小的计算以及影响做功大小的因素。

1.3.1 离心式泵的工作原理

离心式泵(或风机)的工作原理就是在泵内充满流体的情况下,叶轮旋转产生离心力,叶轮槽道中的流体在离心力的作用下甩向外围流进泵壳,于是叶轮中心压强降低,这个压强低于吸水管内压强,流体就在这个压强差的作用下由外界流入叶轮。这样泵就可以不断地吸入流体了。

除了叶轮的作用之外,螺旋形泵壳起的作用也是很重要的,从叶轮里获得了能量的流体流出叶轮时具有较大的动能。这些流体在螺旋形泵壳内被收集起来,并在后面的扩散管里把动能变成压力能。

1.3.2 速度三角形

流体在叶轮中的流动比较复杂,为了研究流体在叶轮内的运动规律,首先要做几点假设:

第一,假设叶轮是叶片无限多、叶片厚度无限薄的理论叶轮。即认为流体质点是严格地沿着叶片的形状流动,流体质点的运动轨迹与叶片型线相重合。

第二,假设流体为理想流体,即没有粘性的流体。由此可暂不考虑叶轮中的流动损失。

第三,假设流动是定常的,即流场不随时间变化。

第四,认为流体是不可压缩的。

现在分析流体在以上假设叶轮中的流动。

泵(与风机)工作时,流体一方面和叶轮一起做旋转运动,一方面又沿叶轮的流道由里向外流动,因此,流体在叶轮里所做的是复合运动。

当叶轮带动流体做旋转运动时,流体质点则具有一个随叶轮旋转的圆周运动(牵连运动),其运动速度称为圆周速度,用 u 表示,它的方向与圆周的切线方向一致,大小与所在半径 r 及转速 n 有关。而流体质点又相对于旋转的叶轮在做相对运动,其运动速度称为相对速度,用 w 表示,它的方向是流体质点所在处的叶片切线方向,大小与流量 Q 及流道形状有关,因而与绝对速度的径向分速度 v_r 及角 β 有关:即 $w = \frac{v_r}{\sin\beta}$ 。流体在叶轮内任何瞬间都既做圆周运动,又做相对运动,我们把流体相对机壳的运动,称为绝对运动,其运动速度称为绝对速度,用 v 表示,它是 u 和 w 的矢量和,即 $v = u + w$,如图 1.9 所示。

由上述关系,可以作出流体在叶轮流道内任意一点的三个速度矢量 v 、 u 及 w ,由这三个速度组成的矢量图,称为速度三角形,如图 1.10 所示。速度三角形是研究流体在叶轮内的能量转换及性能的基础。在研究流动状态时,最重要的是了解叶轮入口和出口处的流体流动情况,因此一般只需作出叶轮入口及出口处的速度三角形就可以了。

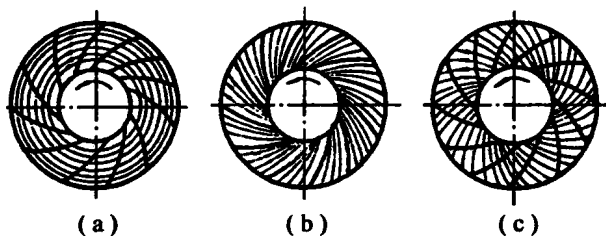


图 1.9 流体在叶轮内的运动

(a) 圆周运动; (b) 相对运动; (c) 绝对运动

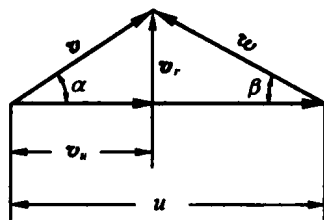


图 1.10 速度三角形

为了计算上的方便,我们把绝对速度 v 分解成两个分量,一个是径向分速 v_r (又称轴面速度),它沿叶轮径向, $v_r = v \cdot \sin\alpha$;另一个是圆周分速 v_u ,沿圆周的切线方向, $v_u = v \cdot \cos\alpha$ 。在速度三角形中,绝对速度 v 与圆周速度 u 间夹角用 α 表示,相对速度 w 和圆周速度 u 反方向之间的夹角用 β 表示,称为流动角。

用符号 β_0 表示叶片的切线和所在圆周切线间的夹角,称为叶片的安装角,它表明了叶片的弯曲方向。当流体沿叶片型线运动时,流动角即等于安装角,即 $\beta = \beta_0$ 。

在下面的内容中,用下标 0 表示进入叶轮前的位置;1 表示进入叶道后的位置;2 表示流道出口前的位置;3 表示流道出口后的位置; ∞ 表示叶片无限多时的参数。

速度三角形,一般只需知道三个条件就可作出。较方便的是求 u 、 v 和 β 角。

(1) 圆周速度 u

$$u = \frac{\pi D n}{60} \quad (1.6)$$

式中 D ——叶轮直径(入口用 D_1 , 出口用 D_2), m;

n ——叶轮转速, r/min。

(2) 径向分速 v_r

由连续方程得

$$v_r = \frac{Q_0}{A} = \frac{Q}{A \eta_v} \quad (1.7)$$

式中 Q_0 ——设计流量, m^3/s ;

Q ——流过叶轮的理論流量, m^3/s ;

η_v ——容积效率;

A ——有效面积(与 v_r 垂直的过流面积), m^2 。

(3) 相对速度 w 的方向或 β 角

当叶片无限多时,相对速度 w 的方向应与叶片安装角的方向一致,即相对速度与圆周切